



原子系综中光学腔增强的Duan-Lukin-Cirac-Zoller写过程激发实验

袁亮 温亚飞 李雅 刘超 李淑静 徐忠孝 王海

Optical cavity enhancement experiment of Duan-Lukin-Cirac-Zoller writing excitation process in atomic ensemble

Yuan Liang Wen Ya-Fei Li Ya Liu Chao Li Shu-Jing Xu Zhong-Xiao Wang Hai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 070302 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201394

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201394>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

读出效率对光与原子纠缠产生的影响

Dependence of performance character of photon-atom entanglement source on retrieval efficiency

物理学报. 2019, 68(2): 020301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181314>

共焦腔增强的空气拉曼散射

Confocal-cavity-enhanced Raman scattering of ambient air

物理学报. 2017, 66(19): 190703 <https://doi.org/10.7498/aps.66.190703>

双光子荧光与相干反斯托克斯拉曼散射显微成像技术的实验研究

Experimental study on two-photon fluorescence and coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy

物理学报. 2017, 66(10): 104204 <https://doi.org/10.7498/aps.66.104204>

冷原子系综内单集体激发态的相干操纵

Coherent manipulation of single collective excitations in a cold atomic ensemble

物理学报. 2018, 67(22): 224203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181183>

量子存储研究进展

Research progress of quantum memory

物理学报. 2019, 68(3): 030307 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190039>

液相硝基甲烷分子振动特性的相干反斯托克斯拉曼散射光谱

Coherent anti-Stokes Raman scattering spectrum of vibrational properties of liquid nitromethane molecules

物理学报. 2018, 67(2): 024208 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171828>

原子系综中光学腔增强的 Duan-Lukin-Cirac-Zoller 写过程激发实验*

袁亮¹⁾²⁾ 温亚飞¹⁾²⁾ 李雅¹⁾²⁾ 刘超¹⁾²⁾ 李淑静¹⁾²⁾
徐忠孝¹⁾²⁾ 王海^{1)2)†}

1) (山西大学光电研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006)

2) (极端光学协同创新中心, 太原 030006)

(2020年8月24日收到; 2020年12月9日收到修改稿)

原子系综中的 Duan-Lukin-Cirac-Zoller (DLCZ) 过程是产生光与原子(量子界面)量子关联和纠缠的重要手段. 当一束写光与原子发生作用时, 将会产生斯托克斯(Stokes)光子的自发拉曼散射, 并同时产生一个自旋波(spin-wave)存储在原子系综中, 上述过程即为 DLCZ 量子记忆产生过程. 这一过程被广泛地研究. 本文将⁸⁷Rb 原子系综放入驻波腔, 并使 Stokes 光子与光学腔共振, 我们观察到有腔且锁定的情况下 Stokes 光子产生概率比无腔时增大了 8.7 倍. 在此条件下研究了 Stokes 光子产生概率和写光功率的关系, Stokes 光子产生概率随写光功率线性增大.

关键词: Duan-Lukin-Cirac-Zoller 方案, 自发拉曼散射, Stokes 光子, 驻波腔

PACS: 03.67.-a, 03.67.Bg, 03.65.Ud

DOI: 10.7498/aps.70.20201394

1 引言

在远距离量子节点之间实现纠缠是量子通信和量子中继的难点之一, 为实现量子中继器^[1,2]、远距离量子通信^[3]和量子密码^[4], 量子节点间纠缠态的分布无疑提供了很有前途的途径. 实现基于原子系综的可伸缩长距离量子通信的最有价值的协议之一是 Duan, Lukin, Cirac 和 Zoller(DLCZ)在 2001 年提出的协议^[3], 由于该方案原理简单, 迅速成为热点研究课题, 相应地发展出大量衍生方案. 然而, 大多方案的一个显著缺点是纠缠光子产率低, 使得长距离纠缠分发难以成功. 高制备速率和纠缠自旋波光子对的确定性产生是量子中继器和

量子网络的重要组成部分. 实现光子-原子纠缠的方式有多种, 其中冷原子系综的自发拉曼散射(SRS)^[5-13]是应用最广泛也是比较简单的方法之一. SRS 的具体过程为一束特定频率的光(写光)与原子相互作用, 产生一个自旋波激发存储在原子中的同时发射出一个 Stokes 光子到空间中, 这一过程叫做 SRS 的写过程; 之后由一束其他频率的光(读光)从相反的方向与原子作用, 这将会把 spin-wave 读出, 同时向空间中发射一个反斯托克斯(anti-Stokes)光子, 这一过程为读过程. 许多实验已经通过 SRS 实现了原子-光子纠缠的产生^[7,9,14-16]. 在原子系综中实现纠缠就要求写激发率较低, 这样可以避免读出噪声过大而引起纠缠降低, 因此, 纠缠光子对的低产生率限制了纠缠在量子中继器中

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2016YFA0301402)、国家自然科学基金(批准号: 11475109, 11274211, 11604191, 11804207, 61805133)和山西省“1331 工程”重点学科建设计划(批准号: 1331KSC)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wanghai@sxu.edu.cn

成功分布的总时间和量子通信的长距离^[17,18]. 为了能够在低激发率的条件下增加纠缠光子对的产生速率, 人们提出了许多方案^[19,20], 包括山西大学光电研究所的研究小组先后实现的空间多模存储^[21] 和时间多模存储^[22]. 但在时间倍增多模自旋波产生过程中, 需要将写激发光多次施加到原子系综中, 由此将引起大的噪声^[21], 而使得纠缠降低^[23]. Simon 等^[23] 提出一个改进方案: 通过光学腔与 Stokes 光子共振, 可以将噪声大大抑制. Heller 等^[24] 通过将原子系综嵌入低精细度光学腔内, 使 Stokes 光子与腔共振, 大大抑制了时间多模存储操作中产生的额外噪声. 本文研究了原子系综中光学腔增强的 DLCZ 写过程激发实验, 利用驻波腔实现了 Stokes 光子产率的倍增, 有腔且锁定的情况下 Stokes 光子产生概率比无腔时增大了 8.7 倍.

2 实验装置及能级结构

我们实验利用⁸⁷Rb冷原子系综的 SRS 过程来实现光与原子纠缠的产生. 图 1 为写过程的实验能级图, 俘获的原子可以处在基态的任一能级上, 因此需要将原子制备到实验所需的能级上, 两束态制备光的频率锁定在 $|5S_{1/2}, F=2\rangle \rightarrow |5P_{1/2}, F'=1\rangle$ 和 $|5S_{1/2}, F=2\rangle \rightarrow |5P_{1/2}, F'=2\rangle$ 上, 其中一束光为左旋圆偏振, 另一束为右旋圆偏振. 两束泵浦光偏振必须相反才能保证将所有的原子从 $|5S_{1/2}, F=2\rangle$ 的原子制备到 $|5S_{1/2}, F=1\rangle$ 上. 以处在 $|5S_{1/2}, F=1, m=0\rangle$ 上的原子为例, 在一束频率锁定在 $|5S_{1/2}, F=1\rangle \rightarrow |5P_{1/2}, F'=2\rangle$ 红失谐 20 MHz 的写光与该能级上的原子发生作用后, 处在 $|5S_{1/2}, F=1, m=0\rangle$ 上的原子就会吸收能量跃迁到 $|5P_{1/2}, F'=2, m=1\rangle$ 能级上, 由于自发拉曼过程, 原子会自发地落到 $|5S_{1/2}, F=2, m=0\rangle$ ($|5S_{1/2}, F=2, m=2\rangle$) 能级, 此时原子内部会存储一个 $|+\rangle$ ($|-\rangle$) 的自旋波激发, 并且激发出一个 $|R\rangle$ ($|L\rangle$) Stokes 光子. 整个过程中, 自旋波激发、写光和 Stokes 光子的波矢量满足 $k_m = k_w - k_s$. 在写过程完成后, 获得了自旋波-光子纠缠态 $|\Phi\rangle = \sqrt{\chi} |\Phi\rangle = \sqrt{\chi} (\cos\theta |+\rangle |R\rangle + \sin\theta |-\rangle |L\rangle)$, $|+\rangle$ ($|-\rangle$) 表示位于能级 $|a, m_a\rangle \rightarrow |b, m_b = m_a\rangle$ ($|a, m_a\rangle \rightarrow |b, m_b = m_a + 2\rangle$) 上的自旋波极化, $|R\rangle$ ($|L\rangle$) 代表 σ^+ (σ^-) 偏振态的 Stokes 光子, 公式中的 $\cos\theta$ 代表 C-G (Clebsch-Gordan) 系数.

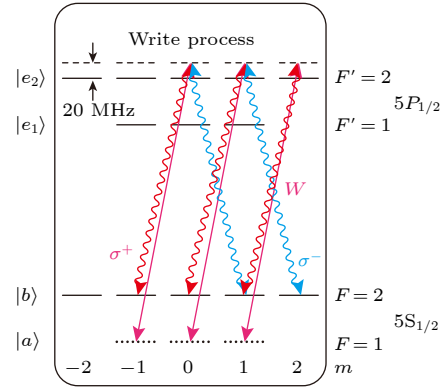


图 1 ⁸⁷Rb 实验能级图 (a) 表示 SRS 中的写过程, W 表示写光光场, σ^+ (σ^-) 代表左 (右) 旋圆偏振的 Stokes 光子
Fig. 1. Relevant ⁸⁷Rb atomic levels. (a) is the writing process of the SRS process, The coupling light field are writing light field (W), σ^+ (σ^-) represents left (right) polarization of Stokes.

实验装置如图 2 所示, 将雪茄型原子长轴定义为 Z 轴, 写光场与 Z 轴夹角为 3° , 并与原子相互作用, 写光功率设置得比较低, 目的是为了避免读出噪声较大引起的纠缠降低. 两束光斑直径为 3.8 和 3.9 mm 且互相重合的泵浦光与量子化轴 Z 轴的夹角为 2° 左右并与原子相互作用, 功率均为 45 mW. 写光、泵浦光脉冲宽度分别为 70 和 250 ns.

为了增强信号光与原子间的耦合强度, 在同等写光功率下增加 Stokes 光子的产率, 且不引入额外的噪声, 在冷原子周围放置了驻波腔. 腔由两个焦距为 400 mm 的平凹镜组成, 反射率分别为 $R=80\%$ 和 $R=99\%$. $R=99\%$ 的平凹腔镜固定在压电陶瓷 (PZT) 上, 用于主动锁定腔长. 腔的长度为 0.6 m, 腰斑大小为 0.7 mm, 实验测得的自由光谱区 (FSR) 为 256 MHz. 腔中所有的光损耗主要包括腔内其他光学元件的 4% 的损耗以及冷原子真空室的 5% 损耗. 冷原子驻波腔的精细度为 19.1. 使用 Pound-Drever-Hall (PDH) 锁模方案来主动稳定腔长, 并使 Stokes 信号光场和锁定光场同时与腔共振. 锁定光通过一个透射率 94% 的分束镜耦合到主光路, 并透过两个腔镜进入到探测器. 俘获原子的过程中腔处于锁定状态, 由于锁定光与信号光共振, 所以实验过程中锁定光关闭, 腔处于短暂的失锁状态, 以防止锁定光进入探测光路.

在实验过程中, 首先要关掉 MOT (magneto optical trap), 并将腔失锁, 之后写光脉冲与原子作用, 产生了一个 spin-wave 的同时一个 Stokes

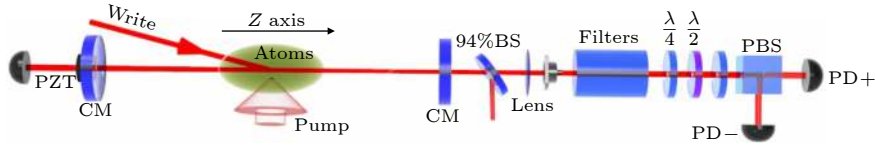


图 2 实验装置图. 其中 PZT 代表压电陶瓷; CM 表示腔镜; BS 表示分束镜; Filter 表示标准具滤波器; $\lambda/4$, $\lambda/2$ 分别代表四分之一波片和二分之一波片; PBS 为偏振分束棱镜; PD 表示单光子探测器

Fig. 2. Experimental setup. PZT represents the piezoelectric ceramic transducer; CM, cavity mirror; BS, beam splitter; Filter, F-P etalon; $\lambda/4$, $\lambda/2$, quarter wave plate and half wave plate; PBS, polarization beam splitter; PD, single photon detector.

光子被激发到空间中, Z 轴方向的 Stokes 光子会在腔内共振. 从 80% 的腔镜透射出腔外的 Stokes 光子会被多模光纤收集, 经过 94% 的耦合镜后进入探测光路. 由于实验环境的限制, 非信号光可能进入到探测光路影响实验结果, 因此在探测光路上放置三个由 F-P 腔加工成的窄带滤波器过滤掉非信号光, 只让信号光透过. 考虑到光纤等光学元件引入相位差导致的偏振变化, 因此要再经过一组波片 $\lambda/4$, $\lambda/2$, $\lambda/4$ 对圆偏相位补偿, 之后经过一个 $\lambda/4$ 波片将 σ^- 和 σ^+ 偏振的光子转换成 H 和 V 偏振, 最后由 PBS 投影到不同的方向探测. 由于光路上光学元件以及探测器的损耗影响, Stokes 光子的探测效率为 30%.

图 3 所示为实验过程的时序图. 整个过程以 30 Hz 频率多次重复, 每个重复周期用时 33.3 ms, 冷却 ^{87}Rb 冷原子团耗时 23.3 ms, 之后的 0.5 ms 期间, 作用一个时长为 20 μs 的态制备光用来进行态制备, 将原子泵浦到实验所用到的能级上, 为后续实验做准备, 接下来的 10 ms 时间用来实现 Stokes 光子的产生收集以及探测. 态制备之后, 写光脉冲与原子作用并在某一角度利用单模光纤收集 Stokes 光子, 若探测器没有响应, 则说明没有探测到信号光子, 自旋波激发也没有被存储到原子中,

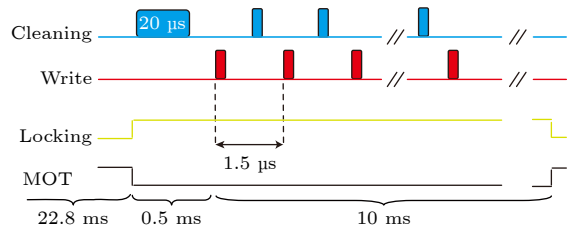


图 3 实验时序图. 图中 Cleaning 为态制备过程, Write 代表写过程, Locking 表示腔锁定时序, MOT 代表冷原子俘获过程

Fig. 3. Time sequence of experimental cycle. Cleaning, the state cleaning process; Write, the writing process; Locking, the locking cavity process; and MOT, the cold atom preparation process.

但原子的状态已经被破坏, 就需要态制备光重新作用于原子, 之后再次发射写光脉冲, 再次进行探测, 这个过程的时间为 1.5 μs , 多次循环, 直到探测到信号光子后, 停止发射写光, 最终探测到的 Stokes 光子信号都会由单光子探测器转变成电信号输入到 FPGA (field programmable gate array) 中进行分析.

3 实验结果与理论分析

在原子系综中, 原子与写脉冲相互作用后, 通过 SRS 机制同时产生 Stokes 光子和 spin-wave. 高的 Stokes 光子的产生率是实验的目标之一, 但是较高的写光功率会导致读出噪声较大, 因此要选择合适的写光功率降低读出噪声. 在合适的写光功率下, 如何产生更多的 Stokes 光子是本实验的主要目的.

考虑原子处于一个理想单端腔中, 其中一个腔镜的反射率为 100%, 另一个反射率 $R = r^2$, 腔内无损耗. 假设腔内有一个原子处在激发态, 且腔内没有光子. 在没有腔的情况下, 单位时间内沿腔方向发射单个光子的概率为 p ; 当添加空腔时, 有几种方法可以使单光子透射出腔外. 首先, 它可能在透射后直接出来. 其次, 它可能已经在空腔中进行了一次往返, 或者两次, 甚至更多次. 写下可能的概率幅:

$$\sqrt{p_1} = \sqrt{p} \cdot t,$$

$$\sqrt{p_2} = \sqrt{p} \cdot r \cdot t,$$

$$\vdots$$

$$\sqrt{p_n} = \sqrt{p} \cdot r^{n-1} \cdot t, \quad (1)$$

其中 $t^2 = T = 1 - R$ 为第二个腔镜的透射率, p_n 表示腔内光子 n 次往返后出射到腔外的概率. 通过调整腔长, 可以实现腔长为光子半波长的整数倍, 光子在腔中往返一次之后相位会增加 2π 的整数倍.

可以计算出单位时间内光子发射出腔外的概率为

$$p_{\text{out}} = \left| \sum_j^{+\infty} \sqrt{p_j} \right|^2 = \frac{pt^2}{(1-r)^2} \simeq \frac{4p}{T}, \quad (2)$$

增强因子为

$$f_{\text{en}} = p_{\text{out}}/p \simeq 2F/\pi, \quad (3)$$

其中 F 为腔的精细度, 若驻波腔与 Stokes 光子共振, 那么相当于 Stokes 光子的产生概率增加了 $2F/\pi$ 倍. 然而, 实际上腔的损耗是实验中不可忽略的重要因素, 考虑腔内损耗后单位时间内光子发射出腔外的概率为

$$p'_{\text{out}} = \left| \sum_j^{+\infty} \sqrt{p_j} \right|^2 \simeq \frac{pt^2}{(1-r \cdot \sqrt{l})^2}, \quad (4)$$

增强因子为

$$f'_{\text{en}} = \frac{F \times T}{(1-r \times \sqrt{l}) \times \pi \times \sqrt{r \times \sqrt{l}}}, \quad (5)$$

其中腔内损耗为 l .

因此在光与原子的量子界面中, 对比了在有无驻波腔的两种不同情况下, 激发率随写光功率的变化. 假设每个写光脉冲都能激发出一个 Stokes 光子, 但是由于光路损耗以及仪器探测效率等因素的影响, 不一定每次都可以探测到, 所以设脉冲总数为 N , 实际的激发率为探测到的 Stokes 总数 N_S 除以总的探测效率 η 再除以总的脉冲数 N , 表示为

$$\chi = N_S / (N \cdot \eta). \quad (6)$$

实验所得结果如图 4 所示.

图中黑色的点代表没有驻波腔时激发率随写光功率的变化, 而红色的点代表驻波腔在锁定时激

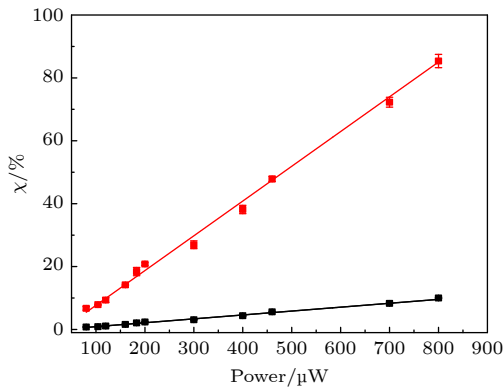


图 4 有无驻波腔时激发率随写光功率的变化对比

Fig. 4. Excitation probability as the function of power of write light field with cavity and without cavity.

发率随写光功率的变化, 红色和黑色的线代表拟合. 可以看出, 两者均为线性变化, 但由于 Stokes 光子在腔内共振, 因此由于增强效应, 随着写光功率的增强, 相比于无腔的情况下, 写激发率迅速增大. 在原子处所加驻波腔的精细度为 19.1, 经过理论计算, 腔锁定的情况下, 同等写光功率的激发率是无驻波腔时激发率的 $f'_{\text{en}} \simeq 8.717$ 倍, 与实验数据的 8.7 倍大致符合.

4 结 论

本文基于 DLCZ 方案在冷原子系综中实现了光与原子纠缠, 并将冷原子系综放置在驻波腔内测量了激发率与写光功率的关系, 且与无驻波腔时做了对比. 实验数据分析表明: 在写光功率相同的条件下, 有驻波腔时激发率是无驻波腔时的 8.7 倍, 且写激发率与写光功率呈线性关系. 本文的工作为在 DLCZ 方案中降低时间多模操作中引起的噪声^[21]提供了实验解决方法.

参考文献

- [1] Sangouard N, Simon C, de Riedmatten H, Gisin N 2011 *Rev. Mod. Phys.* **83** 33
- [2] Yuan Z S, Chen Y A, Zhao B, Chen S, Schmiedmayer J, Pan J W 2008 *Nature* **454** 1098
- [3] Duan L M, Lukin M D, Cirac J I, Zoller P 2001 *Nature* **414** 413
- [4] Gisin N, Ribordy G, Tittel W, Zbinden H 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 145
- [5] Bao X H, Reingruber A, Dietrich P, Rui J, Dück A, Strassel T, Li L, Liu N L, Zhao B, Pan J W 2012 *Nat. Phys.* **8** 517
- [6] Chen S, Chen Y A, Strassel T, Yuan Z S, Zhao B, Schmiedmayer J, Pan J W 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 173004
- [7] Chen S, Chen Y A, Zhao B, Yuan Z S, Schmiedmayer J, Pan J W 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 180505
- [8] Kuzmich A, Bowen W P, Boozer A D, Boca A, Chou C W, Duan L M, Kimble H J 2003 *Nature* **423** 731
- [9] Matsukevich D N, Chaneliere T, Bhattacharya M, et al. 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 040405
- [10] Matsukevich D N, Chaneliere T, Jenkins S D, et al. 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 013601
- [11] Simon J, Tanji H, Thompson J K, Vuletic V 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 183601
- [12] Zhao B, Chen Y A, Bao X H, et al. 2008 *Nat. Phys.* **5** 95
- [13] Zhao R, Dudin Y O, Jenkins S D, et al. 2008 *Nat. Phys.* **5** 100
- [14] de Riedmatten H, Laurat J, Chou C W, et al. 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 113603
- [15] Matsukevich D N, Chaneliere T, Jenkins S D, Lan S Y, Kennedy T A, Kuzmich A 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 030405
- [16] Yang S J, Wang X J, Li J, Rui J, Bao X H, Pan J W 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 210501
- [17] Korzh B, Lim C C W, Houlmann R, et al. 2015 *Nat.*

Photonics 9 163

- [18] Yin H L, Chen T Y, Yu Z W, et al. 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 190501
- [19] Collins M J, Xiong C, Rey I H, et al. 2013 *Nat. Commun.* **4** 2582
- [20] Xiong C, Zhang X, Liu Z, et al. 2016 *Nat. Commun.* **7** 10853
- [21] Tian L, Xu Z, Chen L, Ge W, Yuan H, Wen Y, Wang S, Li S, Wang H 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 130505
- [22] Wen Y, Zhou P, Xu Z, Yuan L, Zhang H, Wang S, Tian L, Li S, Wang H 2019 *Phys. Rev. A* **100** 012342
- [23] Simon C, de Riedmatten H, Afzelius M 2010 *Phys. Rev. A* **82** 010304(R)
- [24] Heller L, Farrera P, Heinze G, de Riedmatten H 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 210504

Optical cavity enhancement experiment of Duan-Lukin-Cirac-Zoller writing excitation process in atomic ensemble*

Yuan Liang¹⁾²⁾ Wen Ya-Fei¹⁾²⁾ Li Ya¹⁾²⁾ Liu Chao¹⁾²⁾ Li Shu-Jing¹⁾²⁾
 Xu Zhong-Xiao¹⁾²⁾ Wang Hai^{1)2)†}

1) (*State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto- Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

2) (*Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

(Received 24 August 2020; revised manuscript received 9 December 2020)

Abstract

The Duan-Lukin-Cirac-Zoller (DLCZ) process in the atomic ensemble is an important means to generate quantum correlation and entanglement between photons and atoms (quantum interface). When a write pulse acts on atoms, the DLCZ quantum memory process will be generated, which has been extensively studied. In the process a spontaneous Raman scattering (SRS) of a Stokes photon is generated, and a spin-wave excitation stored in the atomic ensemble is created at the same time. The higher probability of the generation of Stokes photons will cause more noise and reduce entanglement. On the contrary, the low generation probability of Stokes photons affects the success probability of entanglement distribution on a quantum repeater. How to increase generation probability of Stokes photons without causing more noise is an urgent problem to be resolved. In this work, a ⁸⁷Rb atomic ensemble is placed in a standing wave cavity which resonates with the Stokes photon. This cavity has a trip length of 0.6 m and a free spectral range (FSR) of 256 MHz. The optical loss of all the optical elements in this cavity is 9%, of which 4% loss originates from the other optical elements and 5% loss from the vacuum chamber of the magneto-optical trap (MOT). The fineness of the cavity with the cold atoms is measured to be ~19.1. By calculating the total probability of Stokes photon emission out of the cavity, we derive the enhancement factor of this standing wave cavity when the cavity loss is l . When this cavity is locked with PDH frequency locking technique, we observe that the production probability of the Stokes photons is 8.7 times higher than that without cavity due to the optical cavity enhancement effect. Under this condition, the relationship between the generation probability of Stokes photons and the power of write beam is studied. The write excitation probability changes linearly with the power of write beam. This work provides an experimental solution to reducing the noise caused by time multimode operation in DLCZ scheme.

Keywords: Duan-Lukin-Cirac-Zoller protocol, spontaneous Raman scattering (SRS), Stokes photon, standing wave cavity

PACS: 03.67.-a, 03.67.Bg, 03.65.Ud

DOI: 10.7498/aps.70.20201394

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2016YFA0301402), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11475109, 11274211, 11604191, 11804207, 61805133), and the Fund for "1331Project" Key Subjects Construction of Shanxi Province, China (Grant No. 1331KSC).

† Corresponding author. E-mail: wanghai@sxu.edu.cn